

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA OPTOELÉCTRICO DE MEDICIÓN A VARIAS LONGITUDES DE ONDA



Grado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Trabajo Fin de Grado

Autor: Miguel Lara Arbizu

Tutor: Francisco J. Arregui

Pamplona, 22 JUNIO 2015

AGRADECIMIENTOS:

A mi familia por el apoyo recibido.

A Francisco J. Arregui por la dirección y asesoramiento a lo largo de todo el trabajo, así como a Cesar Elosua Aguado y Jesús Corres por la ayuda recibida.

Al departamento de ingeniería eléctrica y electrónica por las instalaciones y material prestado y a todo el personal.

INDICE

1.-INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	2
2.- ANTECEDENTES	5
2.1.-ESPECTRÓMETROS	5
2.2.-COLORÍMETROS	7
2.3.- TABLA COMPARATIVA.....	9
3.-SOLUCIÓN PROPUESTA	10
4.-MATERIALES	13
4.1.-MICROPROCESADOR.....	13
4.2.-FOTODIODO	14
4.3.-PANTALLA LCD	15
4.4.- CONVERTIDOR DIGITAL-ANALÓGICO.....	15
4.5.- PORTACUBETAS Y PORTALEDS.....	15
4.6.- FUENTE DE ALIMENTACIÓN	16
4.7.- DIODOS LED.....	16
5.-MONTAJE EXPERIMENTAL	17
5.1.- BLOQUE DIODOS LED	18
5.2.- BLOQUE CONVERTOR DIGITAL-ANALÓGICO	20
5.3.- BLOQUE RECOGIDA Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL	22
5.4.- BLOQUE PULSADORES, OSCILADOR Y CONECTOR RJ11	24
5.5.-BLOQUE PANTALLA LCD.....	25
5.6.- BLOQUE DE ALIMENTACIÓN	26
5.7.- DISEÑO PCB.....	28
6.-GUIA DE USUARIO	30
7.-RESULTADOS OBTENIDOS	35
8.-CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	40
9.-PRESUPUESTO	41
10.-BIBLIOGRAFÍA.....	42
11.-ANEXOS	43

RESUMEN:

El objetivo de este trabajo de fin de grado consiste en el diseño y desarrollo de un sistema optoelectrónico de medición a varias longitudes de onda. En el trabajo se explica cómo ha sido implementado el sistema emisor de luz, basado en diodos LED, el receptor y el procesamiento de la señal de medida obtenida, así como la interfaz de visualización de datos y elección de medidas.

ABSTRACT:

The objective of this project is the design and development of an optoelectronic measuring system to several wavelengths. This project explains how it has been implemented the light emitting system based on LEDs, the receiving and processing of the measurement signal obtained, as well as data visualization interface and choice of measures.

KEYWORDS:

- Optoelectrónico
- Fotodiodo
- Espectro
- Medición

1.-INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Desde la antigüedad el ser humano ha mostrado interés en el estudio y comprensión de la luz. Nuestro ojo es capaz de ver solo un pequeño rango del espectro de esta, pero está compuesta por muchas más frecuencias de las que podemos ver.

El estudio de la luz comienza con el experimento del prisma de Isaac Newton, este consistía en hacer pasar un haz de luz blanca, no necesariamente procedente del sol, por un prisma y ver que este se descomponía en diferentes haces de diferente color, precisamente los del arcoíris. Más tarde se comprobó que cada color tenía una frecuencia electromagnética diferente.

En los siglos XVIII y XIX se pudo mejorar este prisma con lentes y rendijas y se consiguió una herramienta mejor para la medida de la luz. Joseph Von Fraunhofer captó la luz solar con esta herramienta y vio que había pequeñas franjas oscuras en el espectro. A partir de aquí se analizaron las luces de diferentes materiales al ser calentados y se pudo ver que cada uno emitía unas bandas de frecuencia diferentes. Con esto se pudo analizar cada material y se creó una “huella digital” de los diferentes elementos.

También se descubrió que calentando suficientemente un material hasta ponerlo incandescente, este producía una luz blanca con el espectro sin ninguna banda oscura. Si se hacía pasar esta luz por un fino material y se captaba la luz que pasaba por este material se observó que en el espectro había unas bandas negras precisamente en las frecuencias en las que emitía luz si se calentaba este mismo material. Este es el origen del estudio de la transmitancia y la absorbancia en los distintos materiales.

Con este proyecto lo que se quiere realizar es un sistema capaz de analizar la transmitancia y absorbancia de muestras a diferentes longitudes de onda producidas por diodos LED. También se implementará el hardware necesario para la medida de fosforescencia, por si en un futuro se amplía el sistema con más opciones de medida.

La motivación por la cual se ha elegido este proyecto es porque es un tema interesante y para llevarlo a cabo se necesitan poner en común diferentes temas vistos a lo largo de la carrera como electrónica analógica, electrónica digital, programación, diseño de tarjetas, etc. Es motivador ver que aplicando conocimientos adquiridos durante estos años se pueden implementar para diseñar sistemas útiles y realizar algo que realmente funcione.

2.- ANTECEDENTES

Actualmente existe una gran variedad de sistemas relacionados con la medición del espectro electromagnético y el comportamiento de la materia frente a diferentes frecuencias de este. Los aparatos existentes comprenden un amplio rango de medición para aplicaciones diversas.

2.1.-ESPECTRÓMETROS

Los espectrómetros son aparatos que indican la absorción o reflexión de energía electromagnética de la materia, es decir haciendo incidir diferentes longitudes de onda a una muestra vemos la cantidad de energía que absorbe o la que rechaza para cada frecuencia. Estos aparatos están compuestos por diferentes partes. La parte más delicada y generalmente más cara es la fuente de luz. Esta suele ser luz blanca, ya que recoge todo el espectro electromagnético. Idealmente esta fuente debe ser de potencia constante. Después está el monocromador y el filtro que sirven para descomponer la luz blanca en todas sus frecuencias y filtrarlas para que vayan incidiendo por rangos en la muestra. Por último se encuentra el sensor, que es el que recoge la luz emitida por la muestra. Estos aparatos son de los más completos que se pueden encontrar en cuanto a aplicaciones se refiere. Se pueden utilizar para medir concentraciones en muestras o para realizar una “huella digital” mediante un espectro de la sustancia medida.

En el mercado existe una amplia gama de espectrómetros, hay algunos de uso general que generalmente son caros y otros con aplicaciones más específicas como la medición de aguas de piscinas, calderas, etc.

Estos son algunos de los muchos ejemplos que pueden encontrarse en el mercado:

Biochrom WPA biowave II UV/VIS 5nm bandpass:

Este es un espectrómetro de la empresa Montreal Biotech Inc. Con un rango de 190-1100nm y con un ancho de banda de 5nm. Utiliza una fuente de luz de xenón. Incorpora métodos pre-programados para medición de ADN, ARN, Oligos proteínas y densidad celular. Accesorios opcionales de exploración de datos vía software para PC. El precio ronda los 7.100€.



Catalog Number	80-3003-75
Wavelength range	190 - 1100nm
Wavelength Accuracy	± 2nm
Wavelength Reproducibility	± 1nm
Light Source	Xenon
Optical system	Split Beam, Monochromator Holographic Grating
Bandwidth	5 nm
Detector	1024 element CCD array
Photometric Range	-0.300 -> 2.500A
Photometric accuracy	+/- 0.003A @ 0 / 0.5A @ 546nm
Stray Light	<0.5%T at 220 nm and 340 nm using NaNO2
Stability	0.5%T @ 220 & 340nm
Spectral Scanning	Yes
Measurement Type	Fixed Wavelength (Abs/%T), Abs ratio, concentration (standard curve), concentration (factor), multiwavelength, kinetics, Life Science Methods, cell density
Cuvette holder	1
Accessories	Printer
Temperature Control	-
Methods	-> 90
Regulatory Compliance	CE
Printer	Thermal built in*, External via Export*
Data Output	Print*, Store*, Export to PC*
Data collection	SD card*, Bluetooth*, USB cable*
Display	Graphics LCD
PC interface	USB
Software Languages (on-board software)	English
Power	90-250 V AC, 50/60Hz, 30VA
Net Weight	4.5Kg (9.9lb)
Dimensions	100 x 260 x 390 mm (3.9 x 10.2 x 15.3 inches)
Demo Soft.	Download / Télécharger

Imagen 2.1.- Espectrómetro Biowave II.

Libra S60:

Este es un espectrómetro también de la empresa Montreal Biotech Inc. Es un espectrómetro más completo que el anterior, con un rango de 190-1100nm. Lleva variedad de aplicaciones pre-programadas. Utiliza una lámpara de xenón. Es para uso de varios usuarios, ya que cada uno puede configurar su propio proyecto y está protegido por password. El precio ronda los 10.000€.

Mediciones:

- Longitud de onda fija
- Abs
- %T
- Ratio de abs
- Factor de concentración
- Concentración(curva 7estándar)
- Longitudes de onda múltiples
- Cinética
- Editor de ecuaciones
- Método de ciencias de la vida integrados



Imagen 2.2.- Espectrómetro Libra S60.

2.2.-COLORÍMETROS

Otros dispositivos que se encuentran en el mercado son los colorímetros. Estos dispositivos se usan principalmente para medir el color de diferentes muestras. También pueden usarse para medir la absorbancia de una muestra a diferentes longitudes de onda y por consiguiente su concentración. Hay colorímetros con distintos tipos de funcionamiento según a la aplicación que estén enfocados. El funcionamiento es el de recoger la luz reflejada en la muestra procedente de una fuente de luz, generalmente diodos LEDs, y comparar la lectura con unos patrones preestablecidos. Para medir la concentración de la muestra lo que se hace es incidir una luz de una determinada longitud de onda sobre la muestra y ver cuanta luz es absorbida por esta. De esta manera podemos calcular la absorbancia de la sustancia. Previamente se realiza una curva de calibración con concentraciones conocidas para poder extrapolar el resultado de la muestra y calcular su concentración.

HI96701, HI96711, HI96734:

Es una gama de espectrómetros para la medición de cloro libre y total en aguas de piscinas, aguas residuales, procesos industriales, etc. La fuente de luz es una lámpara de tungstenos con un filtro en 555nm. El precio varía desde los 350€ hasta los 550€.



Especificaciones	HI 96701 Cloro Libre	HI 96711 Cloro Libre y Total	HI 96734 Cloro Libre y Total
Rango Cloro Libre:	0.00 a 5.00 mg/l	0.00 a 5.00 mg/l	0.00 a 10.00 mg/l
Rango Cloro Total:	NO DISPONIBLE	0.00 a 5.00 mg/l	0.00 a 10.00 mg/l
Precisión:	±0,02 mg/l @ 1,00 mg/l	±0,03 mg/l @ 1,00 mg/l	±0,06 mg/l @ 3,00 mg/l
Resolución:	0,01 mg/l de 0,00 a 3,50 mg/l; 0,10 mg/l superior a 3,50 mg/l	0,01 mg/l de 0,00 a 3,50 mg/l; 0,10 mg/l superior a 3,50 mg/l	0,01 mg/l de 0,00 a 3,50 mg/l; 0,10 mg/l superior a 3,50 mg/l
Fuente emisora:	Banda estrecha @ 555 nm		
Fuente de luz :	Lámpara de Tungsteno		
Tipo de Luz Emisora:	Fotocélula de silicio		
Condiciones de uso:	0 a 50 °C; máx 95% HR sin condensación		
Duración y Tipo de Pila:	1 x 9V / 200 horas aprox de uso continuo. Auto-apagado después de 10 minutos sin usar		
Método:	Adaptación del método 330.5 de USEPA y 4500-Cl G de Standard Methods. La reacción entre el cloro libre y el reactivo DPD causa una coloración rosa en la muestra.		
Dimensiones:	192 x 102 x 67 mm.		
Peso:	290 g.		

Imagen 2.3.- Medidor cloro.

DR 900 HACH:

Este colorímetro mide transmitancia, absorbancia y concentración. La fuente de luz es producida por diodos LED a 420nm, 520nm, 560nm, y 610nm. El detector es un fotodiodo de silicio.



Imagen 2.4.- Colorímetro DR 900 Hacha.

2.3.- TABLA COMPARATIVA

	Absorbancia	Transmitancia	Concentración	Fuente luz	Detector	Precio
<u>Biowave II</u>	si	si	si	Xenón	CCD array	7.100€
Libra S60	si	si	si	Xenón	Fotodiodo silicio	10.000€
HI96701, HI96711, HI96734	no	no	si	Tungsteno	Fotocélula de silicona	350-550€
DR 900	si	si	si	Diodos LED	Fotodiodo de silicio	1.283€

Tabla 2.1.- Comparativa sistemas.

3.-SOLUCIÓN PROPUESTA

El objetivo del proyecto es obtener un sistema que mida la absorbancia y transmitancia de diversas muestras para su posterior estudio. Primeramente se introduce una muestra blanca y seguidamente la muestra a estudiar. El resultado que se quiere obtener es la absorbancia relativa, es decir, el cociente entre el resultado de la medición para las dos muestras. También se puede hacer la medida absoluta por si el usuario quiere trabajar con ese dato. También se implementará el hardware necesario para posibles medidas de fosforescencia en un futuro.

El sistema que se ha pensado para dar solución a los objetivos a conseguir es una placa PCB con diversos componentes para la obtención y posterior tratamiento y procesamiento de la señal. La placa debe ser lo más compacta posible y con un coste asequible.

Para la realización de la medida el sistema cuenta con una fuente de luz emitida por tres diodos LED. Cada diodo LED emite una radiación de distinta longitud de onda dentro del rango visible del espectro electromagnético. Los diodos LED deben tener el ángulo de dispersión de la onda lumínica producida lo más pequeño posible para así concentrar la mayor potencia en la muestra. El sensor encargado de recoger la señal obtenida a la salida de la muestra es un fotodiodo capaz de captar la luz en un rango de 300nm hasta 800nm aproximadamente. Este se debe escoger con la mayor respuesta A/W posible para que así la señal producida por este no sea muy débil, ya que estos componentes, generalmente, producen poca corriente.

Para la conversión y amplificación de la señal producida por el fotodiodo se incluye un amplificador de transimpedancia. Este transductor está compuesto por un amplificador operacional cuya salida está conectada a la entrada inversora del A.O. por medio de un potenciómetro para poder regular el voltaje de salida y adaptar la señal del fotodiodo al rango de entrada del PIC. El fotodiodo está conectado también a la entrada inversora en polarización inversa. A la salida del transductor se coloca un seguidor de voltaje para aislar la señal del resto del circuito y que la medición no afecte al sensado de la señal.

Para la alimentación de los diodos LED se ha implementado un circuito mediante un convertidor digital-analógico conectado a uno de los puertos del microcontrolador. La salida de este convertidor produce una intensidad proporcional a los bits que le llegan del microcontrolador al puerto paralelo del convertidor. La salida se introduce a un amplificador de transimpedancia y posteriormente a un seguidor de voltaje de la misma manera que con el fotodiodo. De esta manera podremos controlar el voltaje de alimentación y por consiguiente la iluminación de los LEDs.

Los datos se muestran en una pantalla LCD de 2x16 caracteres alfanumérica. Esta va conectada al microcontrolador, el cual controla el texto y los datos a mostrar. Incorpora un potenciómetro para regular el contraste del texto.

El elemento encargado de controlar el correcto funcionamiento del circuito es un microcontrolador. Este es el encargado de encender y apagar los diodos LED en una secuencia establecida, recoger la señal procedente del fotodiodo para tratarla y sacar los datos por la pantalla LCD. Además mediante uno de los puertos controla el voltaje de alimentación de los diodos.

El circuito es alimentado mediante una fuente de alimentación externa conectada a la red. La fuente incorpora un transformador para adecuar la tensión de la red a la del circuito. Dentro de la placa se incorporan reguladores de tensión para obtener las distintas tensiones de alimentación del circuito. También se incorporan filtros para minimizar lo máximo posible los ruidos producidos por la red y por los convertidores

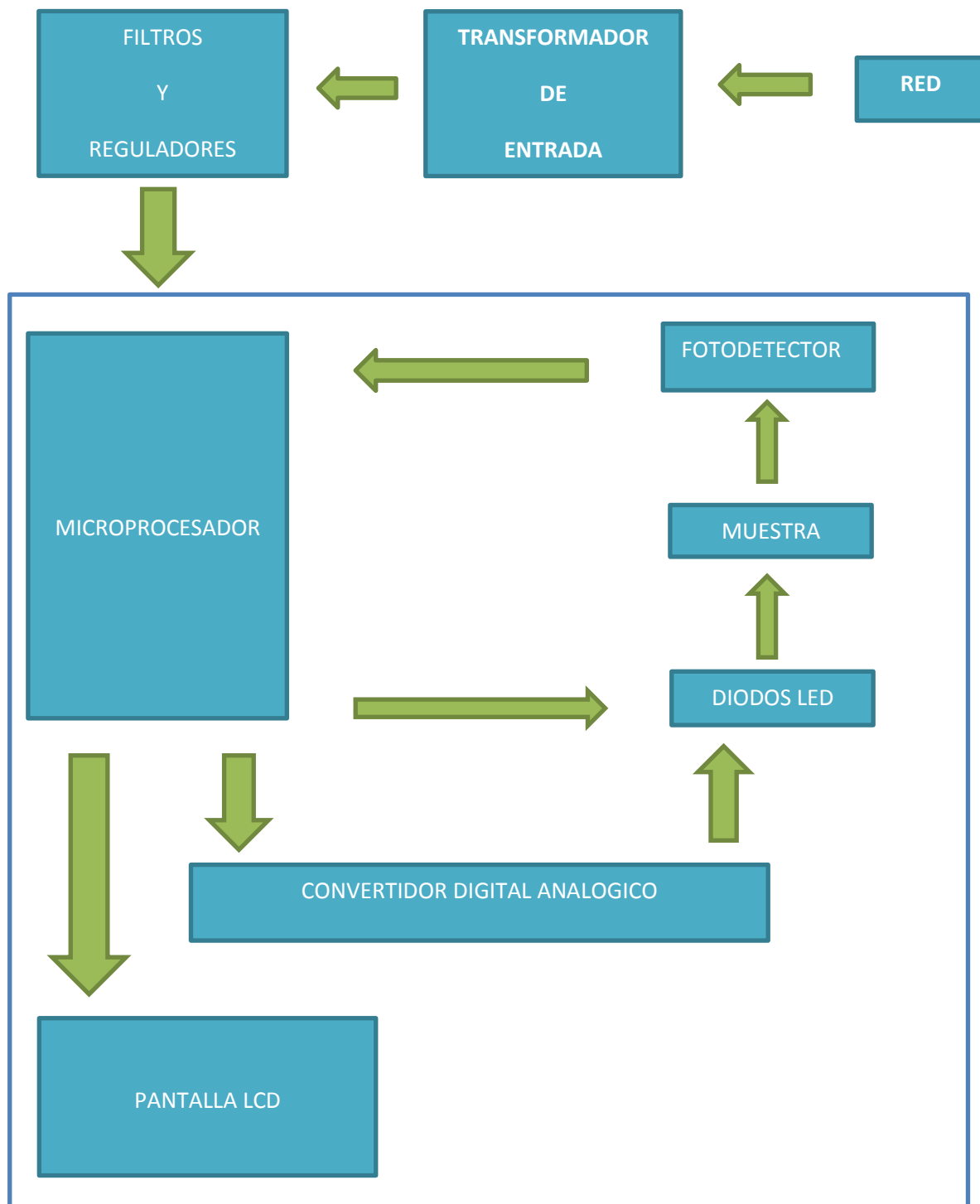


Imagen 3.1.- Esquema bloques.

4.-MATERIALES

Los materiales a utilizar en este proyecto son principalmente componentes electrónicos para montaje en PCB. Se han escogido bien por criterio del propio diseño del dispositivo o porque para el montaje de alguno de ellos en la hoja de características el fabricante proporciona un circuito recomendado para su correcto funcionamiento. La mayoría de componentes más específicos como el fotodiodo o el microprocesador se han comprado vía online en las páginas de RS Components, Mouser y Farnell. Los elementos más sencillos como resistencias o potenciómetros se han obtenido de la clase de electrónica básica del departamento de ingeniería eléctrica-electrónica de la UPNA.

A continuación se realizará una descripción de los elementos clave del dispositivo.

4.1.-MICROPROCESADOR

Este es el elemento más importante ya que mediante el código programado previamente se controla la sucesión de los pasos que debe seguir el proceso de medición así como el correcto funcionamiento del mismo.

El microprocesador que se ha escogido es un PIC de la familia 16F, en concreto el PIC 16F877A. El dispositivo cuenta con ocho módulos de conversión analógico-digital de 10 bit, que se utilizarán para recoger la señal procedente del fotodiodo. Cuenta con entradas y salidas suficientes para satisfacer las necesidades requeridas, en concreto cuenta con cuatro puertos y cada puerto cuenta con 8 pines de entrada o salida configurables vía software, a excepción del puerto A que solamente cuenta con 6 pines. El oscilador interno con el que cuenta el micro es de 20MHz, pero pueden acoplarse otros osciladores externos para poder trabajar a diferentes frecuencias.

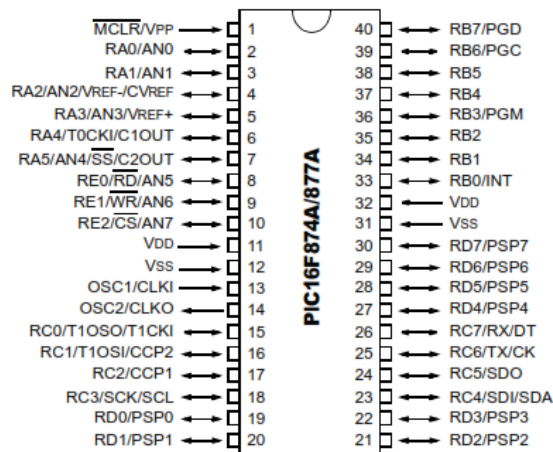


Imagen 4.1.- PIC 16F877A.

4.2.-FOTODIODO

Es un fotodiodo de silicio difuso plano diseñado para aplicaciones de alta velocidad y sensibilidad. Tiene un rango de captación de espectro de 350 a 1100nm. Tiene una responsividad típica de 0.65 A/w en su punto máximo que se encuentra a 970nm y cuenta con un área activa de 16,5mm². La combinación de estas dos características hace que la corriente generada por este fotodiodo sea aceptable para la aplicación que se le quiere dar.

Dos de los aspectos que se deben tener en cuenta según la aplicación que se le quiera dar al dispositivo son la capacidad parásita y la corriente generada en oscuridad total. Estos parámetros responden de diferente manera al voltaje de polarización inversa. En el caso de la capacidad, a más voltaje de polarización, esta disminuye y con la corriente oscura ocurre lo contrario, a más voltaje más corriente. Esta última también aumenta con la temperatura.

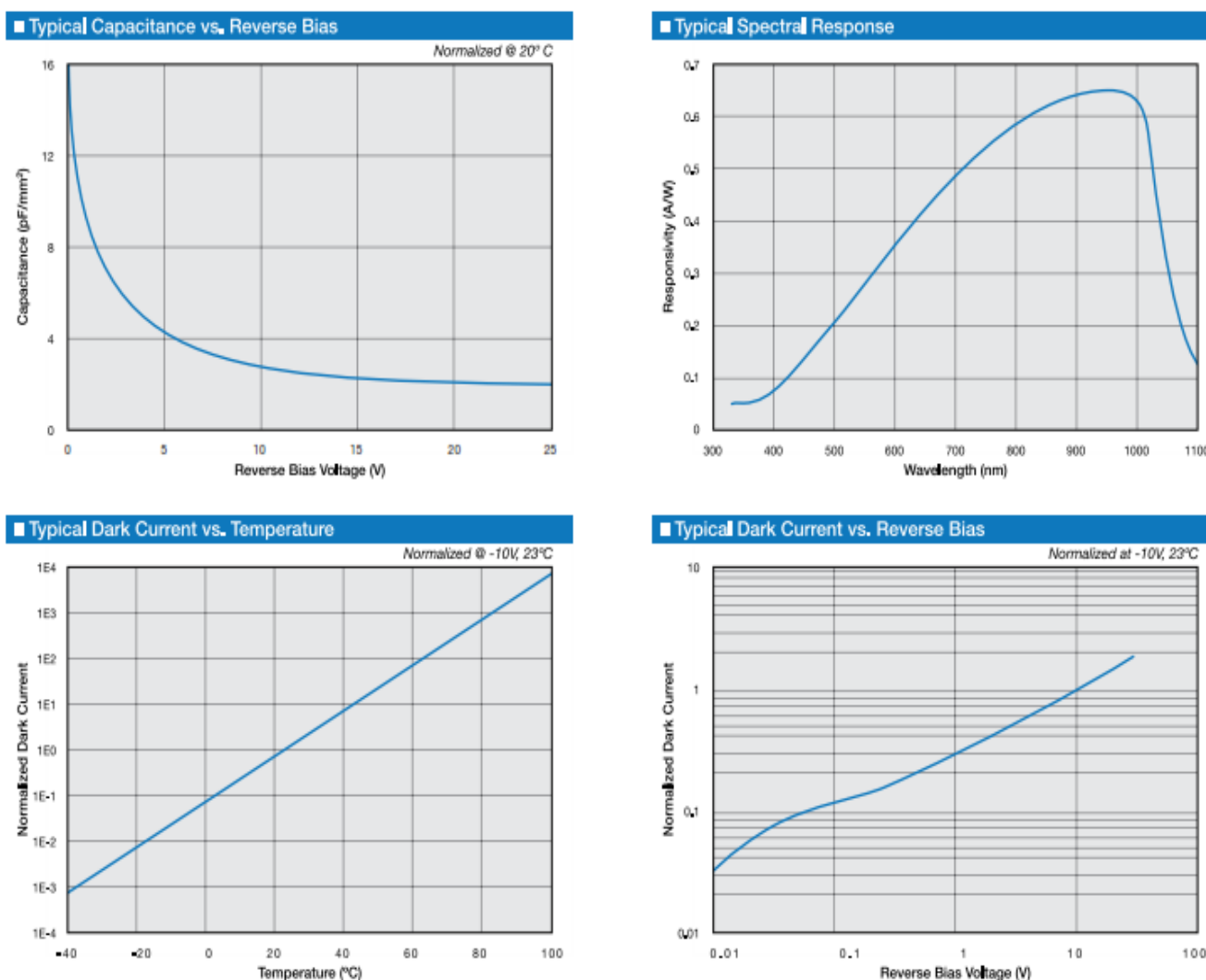


Imagen 4.2.- Curvas características fotodiodo.

4.3.-PANTALLA LCD

El dispositivo para mostrar los datos es una pantalla LCD de 16 caracteres por línea y dos líneas. Utiliza el controlador Hitachi HD44780 que es el mismo que utiliza el PIC, lo que hace que sea compatible con las librerías que se utilizan.

4.4.- CONVERTIDOR DIGITAL-ANALÓGICO

El convertidor es el DAC 0808 de Texas Instruments. Este tiene una resolución de 8 bit y tiene entrada paralela por la cual llega el número binario procedente del PIC que lo convierte a una corriente proporcional.

En este dispositivo es posible ajustar el rango de salida mediante las patillas Vref+ y Vref-. Con esto se podrá ajustar la variación de voltaje a la salida por cada bit.

4.5.- PORTACUBETAS Y PORTALEDS

El porta cubetas es la pieza encargada de alojar la muestra a medir. Tiene unas medidas de 50x25x40mm y es de acero. Está preparada para cubetas estándar de 10mm. Tiene un orificio alineado con la fuente de luz para alojar el fotodiodo encargado de recoger la señal de salida de la muestra en la medida de la transmitancia y absorbancia. También cuenta otro orificio en perpendicular al haz de luz para la medida de la fosforescencia.

El porta leds es una lámina de acero de 50x50x5mm y es la encargada de mantener los LED alineados correctamente. Tiene tres agujeros de 8mm de diámetro para poder introducir las monturas en cuyo interior se colocan los diodos LED. Los diodos de la parte superior e inferior tienen una inclinación de 20° con respecto al eje del agujero central para que el haz de luz apunte hacia el fotodiodo.



Imagen 4.3.- Porta cubetas y porta leds.

4.6.- FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Es una fuente de la empresa Multicomp. Tiene un rango de entrada de 90-230V de corriente alterna. La salida es de 5v, lo que hace que no haya que colocar ningún conversor DC/DC a la salida de la fuente para alimentar al circuito, ya que todos los componentes van alimentados a este mismo voltaje. Tiene una potencia de 12W y no precisa de ninguna carga mínima.



Imagen 4.4.- Fuente alimentación.

4.7.- DIODOS LED

Se han escogido intentando abarcar diferentes partes del rango visible del espectro electromagnético. De este modo las longitudes de onda elegidas son 455nm, 575nm y 626nm. Todos son con un encapsulado de 5mm de diámetro.

Características:

Diodo 455nm azul:

- Angulo de haz de salida = 16°
- Voltaje directo = 3.8 voltios
- Potencia máxima = 105 mW
- Intensidad nominal = 20mA
- Intensidad luminosa (a intensidad nominal) = 150 mcd

Diodo 575nm amarillo:

- Angulo de haz de salida = 4°
- Voltaje directo = 2.4 voltios
- Potencia máxima = 100 mW
- Intensidad nominal = 20mA
- Intensidad luminosa (a intensidad nominal) = 700 mcd

Diodo 626 nm rojo:

- Angulo de haz de salida = 8°
- Voltaje directo = 1.9 voltios
- Intensidad nominal = 20mA
- Intensidad luminosa (a intensidad nominal) = 9300 mcd

Anteriormente se ha descrito el circuito de manera global para que el lector se haga una idea del funcionamiento del mismo y como está distribuido. En este apartado se va a describir con más profundidad el funcionamiento y los cálculos procedentes. También se aportarán esquemas para una mejor visualización.

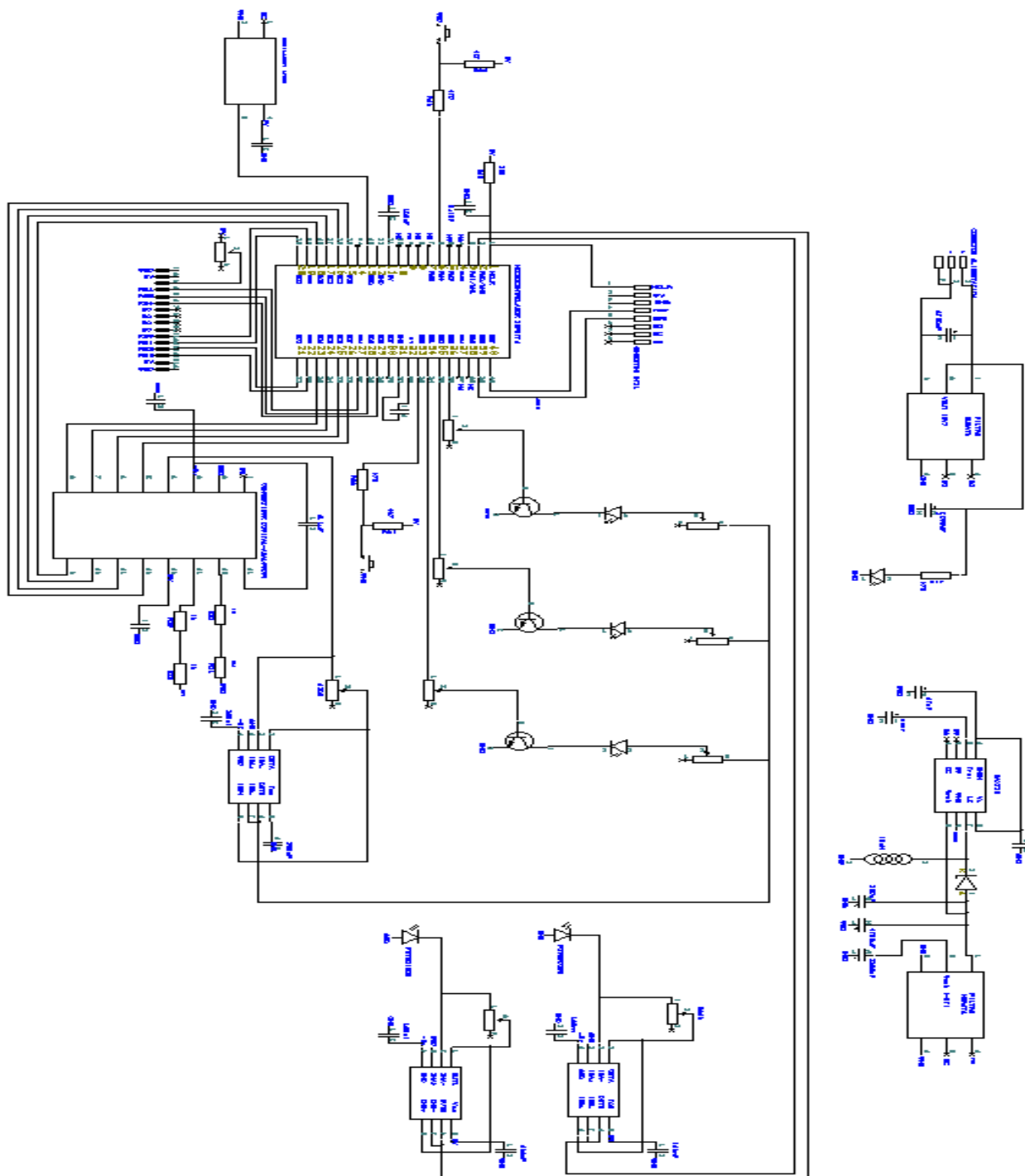


Imagen 5.1.- Esquema general.

En el esquema anterior se puede ver el circuito general y como están conectadas sus distintas partes entre sí. En todas la alimentaciones de los integrados se han colocado condensadores de desacoplo de 100nF. Para poder explicar mejor el circuito se ha dividido en bloques y se ha explicado más detalladamente.

5.1.- BLOQUE DIODOS LED

Este bloque es el encargado de producir la luz de diferentes longitudes de onda que se hacen pasar a través de la muestra.

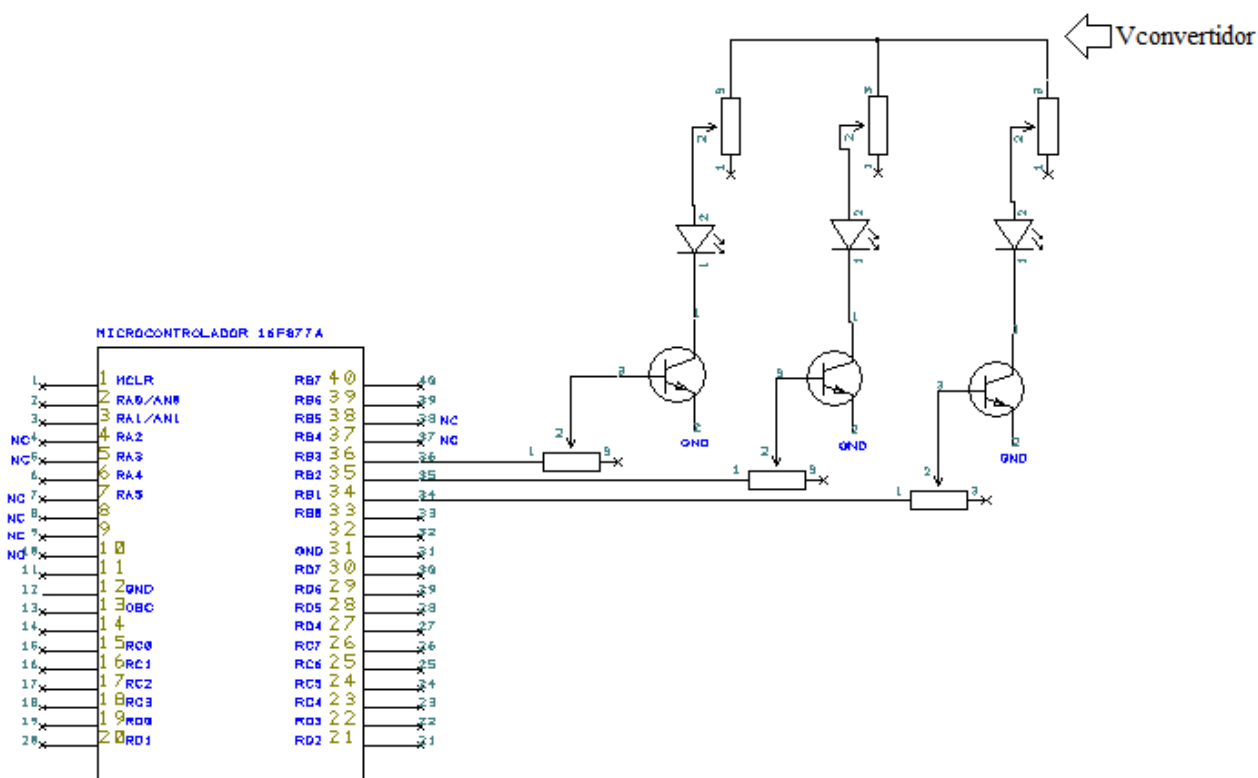


Imagen 5.2.- Bloque diodos LED.

Este es un sistema simple para el encendido y apagado de los diodos LED. Los transistores, BC548, son controlados por las salidas RB1, RB2 y RB3 del microcontrolador. Estas salidas se ponen a 1 cuando se le da la orden mediante los pulsadores y la pantalla LCD. El programa del microcontrolador es el encargado de llevar la secuencia y el tiempo de encendido y apagado de las patillas.

Las salidas están conectadas a la base de los transistores mediante una resistencia variable. Cuando las salidas están a uno, en la patilla correspondiente hay un voltaje de 5v, y cuando está a cero en la patilla hay 0v. De este modo cuando hay un uno, el transistor se satura y el LED se ilumina. El voltaje que le llega al LED viene del convertidor y es variable. Los cálculos se han hecho con el voltaje máximo que da el convertidor que será cuando pase la mayor intensidad por el colector del transistor.

Cálculos:

Tomando como máximo de intensidad la nominal (20mA):

$$R_{\text{colector}} = (V_{\text{convertidor}} - V_{\text{diodo}} - V_{\text{ce}}) / 20\text{mA}$$

Diodo 455nm:

$$R_c = (5\text{v} - 3.8\text{v} - 0.2\text{v}) / 20\text{mA} = 50 \Omega$$

Diodo 575nm:

$$R_c = (5\text{V} - 2.4\text{v} - 0.2\text{v}) / 20\text{mA} = 120 \Omega$$

Diodo 626nm:

$$R_c = (5\text{v} - 1.9\text{v} - 0.2\text{v}) / 20\text{mA} = 145 \Omega$$

En todos los casos se han colocado potenciómetros cercanos al valor calculado para poder ajustar manualmente y con más precisión la intensidad.

$$I_b = I_c / \beta \rightarrow I_b = 20\text{mA} / 150 = 133.33 \mu\text{A}$$

Esta es la intensidad mínima de base para que se sature el transistor.

$$R_{\text{base}} = (5\text{v} - V_{\text{be}}) / I_b \rightarrow R_{\text{base}} = (5\text{v} - 0.7\text{v}) / 133.33\mu\text{A} = 32250.8 \Omega$$

La intensidad de base para que se sature el transistor deberá ser igual o mayor a la calculada.

Con estos cálculos se garantiza que los transistores se saturen para los diodos LED escogidos. Si se querría cambiar algún LED por otro con longitud de onda o algún otro parámetro diferente habría que calcular la resistencia de colector necesaria para que circule la corriente nominal. Después de esto habría que ajustar manualmente el potenciómetro correspondiente hasta que por el colector circule la intensidad deseada.

5.2.- BLOQUE CONVERSOR DIGITAL-ANALÓGICO

Con este bloque y mediante el menú, se puede seleccionar la luminosidad de los diodos LED. Habiendo calculado el circuito anterior para un voltaje de alimentación máximo de 5v, si se disminuye el voltaje de alimentación disminuye la intensidad que pasa por el LED y por lo tanto su luminosidad. El circuito para la aplicación típica que marca el fabricante es el siguiente:

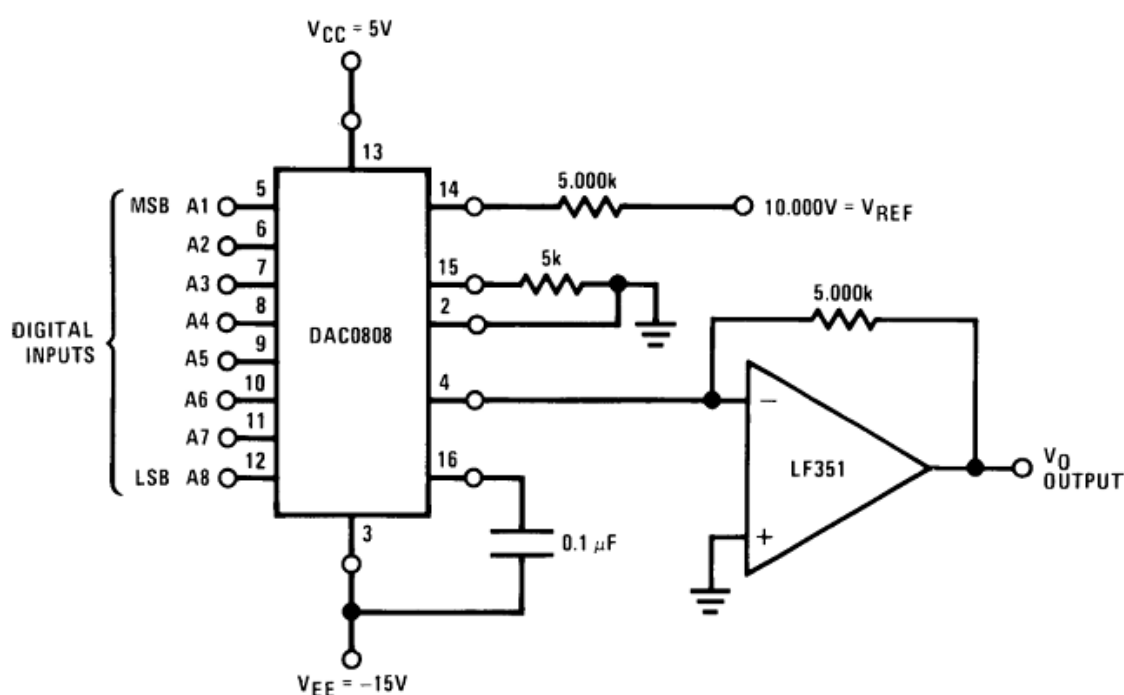


Imagen 5.3.- Circuito DAC 0808.

El integrado del convertidor DAC 0808 está alimentado entre 5v y -5v en las patillas Vcc y Vee, que son las patillas 13 y 3 respectivamente. Los voltajes de referencia y las resistencias son a modo de ejemplo, dependiendo del valor que queramos conseguir a la salida estos variarán.

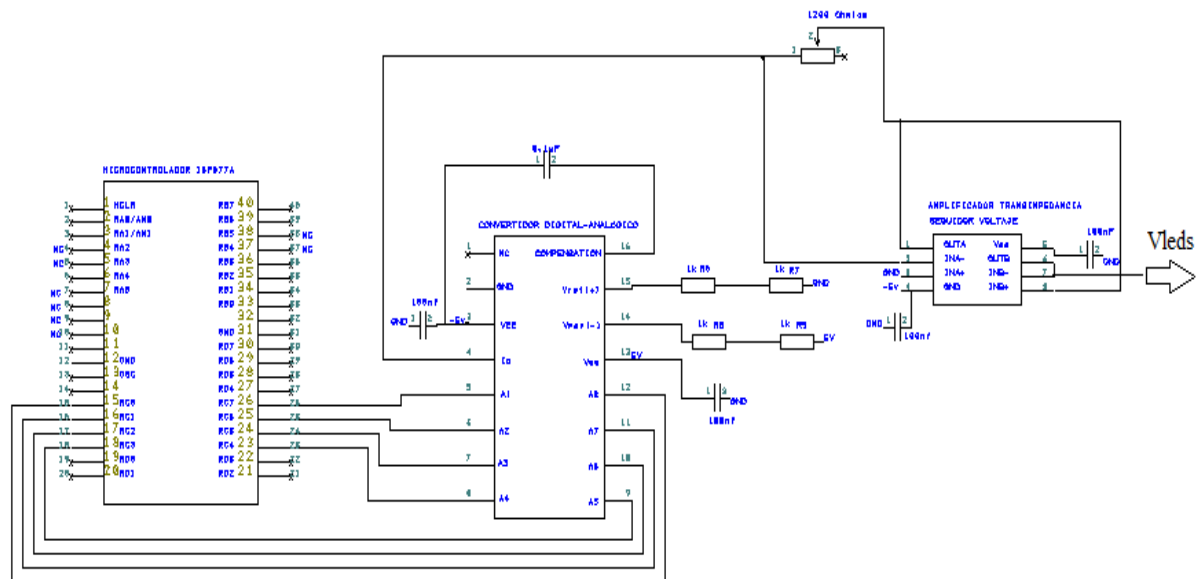


Imagen 5.4.- Bloque conversor analógico-digital.

El conversor está conectado al puerto C del microcontrolador por el cual sale el número binario correspondiente al voltaje que se desea sacar. Este número entra al puerto paralelo del conversor correspondientes a las patillas de la 5, bit más significativo, hasta la 8, bit menos significativo.

La intensidad de salida viene dada por la siguiente fórmula:

$$I_o = \left(\frac{V_{ref}}{R_6 + R_7} \right) * \left(\frac{A_1}{2} + \frac{A_2}{4} + \frac{A_3}{8} + \frac{A_4}{16} + \frac{A_5}{32} + \frac{A_6}{64} + \frac{A_7}{128} + \frac{A_8}{256} \right)$$

Las resistencias R6 y R7 se han escogido de manera arbitraria ya que en lo único que influyen es en el rango de la corriente de salida, que en función de la resistencia que se pone en el amplificador de transimpedancia posterior da siempre lo mismo. Para la mayor corriente de salida tendrán que corresponder 5v y para la menor corriente 0v. Con esto y escogiendo 2k como resistencia, 5v de Vref+ y 0v de vref- tendremos:

$$I_{o\max} = \frac{5v}{2000} * \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} + \frac{1}{32} + \frac{1}{64} + \frac{1}{128} + \frac{1}{256} \right) = 2.49 \text{ mA}$$

Esta intensidad entra en el integrado MCP6282, que contiene dos amplificadores operacionales con la siguiente disposición:

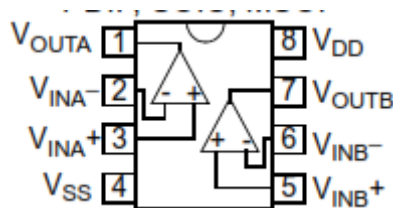


Imagen 5.5.- Esquema MCP6292.

Así si tenemos que la corriente máxima de salida son 2.49 mA y se quieren conseguir 5v la resistencia del amplificador deberá ser:

$$R = \frac{5v}{2.49mA} = 2008 \text{ ohmios}$$

Este voltaje se introduce en el siguiente amplificador del integrado en montaje de seguidor de tensión para que el circuito de los diodos LED esté aislado con respecto al bloque del convertidor.

El conversor tiene una resolución de 8 bit, por lo tanto cada bit variará el voltaje a la salida en:

$$V = \frac{5v}{2^8} = 0.0195 v$$

5.3.- BLOQUE RECOGIDA Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

En este bloque y mediante el fotodiodo, la luz que atraviesa la muestra es recogida y tratada para poder interpretarla. Se disponen de dos circuitos iguales, uno para la medida de la transmitancia y absorbancia, en el cuál el fotodiodo se encuentra enfrente a la fuente de luz. El segundo es para la medida de la fosforescencia, en el cual el fotodiodo se encuentra perpendicular a la fuente de luz para que solo capte la luz emitida por la muestra y no la de la fuente.



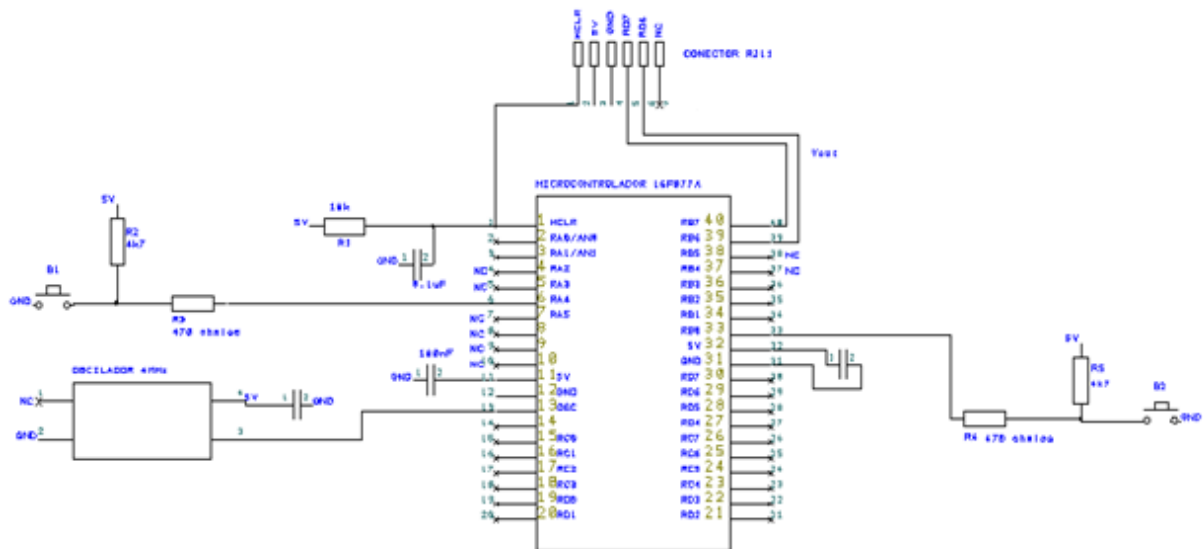
Para el cálculo de la resistencia del amplificador, se han hecho una serie de pruebas para ver cuál es el diodo que más luz emite y por lo tanto más corriente genera. En este caso el diodo más luminoso es el de 626 nm que produce una intensidad en el fotodiodo de 92uA aproximadamente. Si queremos adaptar el máximo rango de entrada del convertidor analógico-digital del micro, el cual son 5v, debemos tomar esta señal como la máxima y por lo tanto deberá producir 5v aproximadamente. Para ello la resistencia deberá ser:

En las pruebas los otros diodos LED han dado una señal aproximada de $6\mu A$, con lo que a la salida dan una tensión de:

Esta tensión quizá sea un poco pequeña y la poca variación de intensidad producida por estos diodos LED producirá poca variación de voltaje, lo cuál puede ser un problema. Para solucionar esto lo que se ha hecho es tomar como máxima señal la

$$R = \frac{5v}{22\mu A} = 227272.72 \Omega$$

5.4.- BLOQUE PULSADORES, OSCILADOR Y CONECTOR RJ11



Para poder movernos por el menú, se han incorporado los pulsadores B1 y B2 conectados a las entradas del micro RA4 y RB0 respectivamente. Los pulsadores están conectados con una lógica inversa, es decir cuando no están pulsados, en la entrada se obtiene un 1 y cuando se pulsan en la entrada se obtiene un 0.

Para poder programar el microcontrolador sin necesidad de ser desalojado del circuito se ha colocado un conector RJ11. Este conector está configurado para ser conectado a un debugger ICD3, las patillas de este están conectadas de la siguiente manera:

- Patilla 1: MCLR (patilla 1 micro)
- Patilla 2: 5v
- Patilla 3: GND
- Patilla 4: PGD (patilla 40 micro)

- Patilla 5: PGC (patilla 39 micro)
- Patilla 6: NC

5.5.-BLOQUE PANTALLA LCD

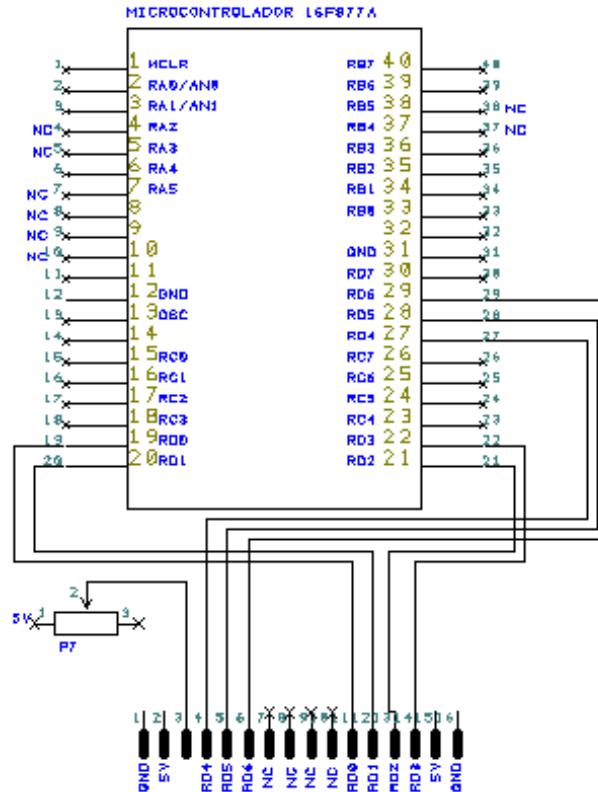


Imagen 5.8.- Bloque pantalla LCD.

La pantalla LCD está controlada mediante las salidas del puerto B del microcontrolador. Está configurada para trabajar en módulo de 4bit, es decir los datos se envían por un bus de 4 pines. Las patillas de la pantalla LCD están conectadas de la siguiente manera:

- Pin 1: GND
- Pin 2: 5v
- Pin 3: potenciómetro 10k. Ajuste de contraste.
- Pin 4: RD4 (patilla 27 micro). Para diferenciar si llega un dato o una instrucción.
- Pin 5: RD5 (patilla 28 micro). Para leer o escribir.
- Pin 6: RD6 (patilla 29 micro). Señal de habilitación del módulo LCD.
- Pin 7-8-9-10: No conectados
- Pin 11-12-13-14: RD0, RD1, RD2, RD3 (patillas 19, 20, 21, 22 micro). Bus de datos.
- Pin 15: 5v. Ánodo luz LED
- Pin 16: GND. Cátodo luz LED

5.6.- BLOQUE DE ALIMENTACIÓN

Para adaptar la tensión de la red a las necesidades del circuito se incorporan varias etapas en el circuito. Primeramente, la fuente de alimentación adapta la señal alterna de la red a 5 voltios en continua. Después se implementa una etapa que consta de dos filtros de choke y un convertor DC/DC de 5v a -5v.

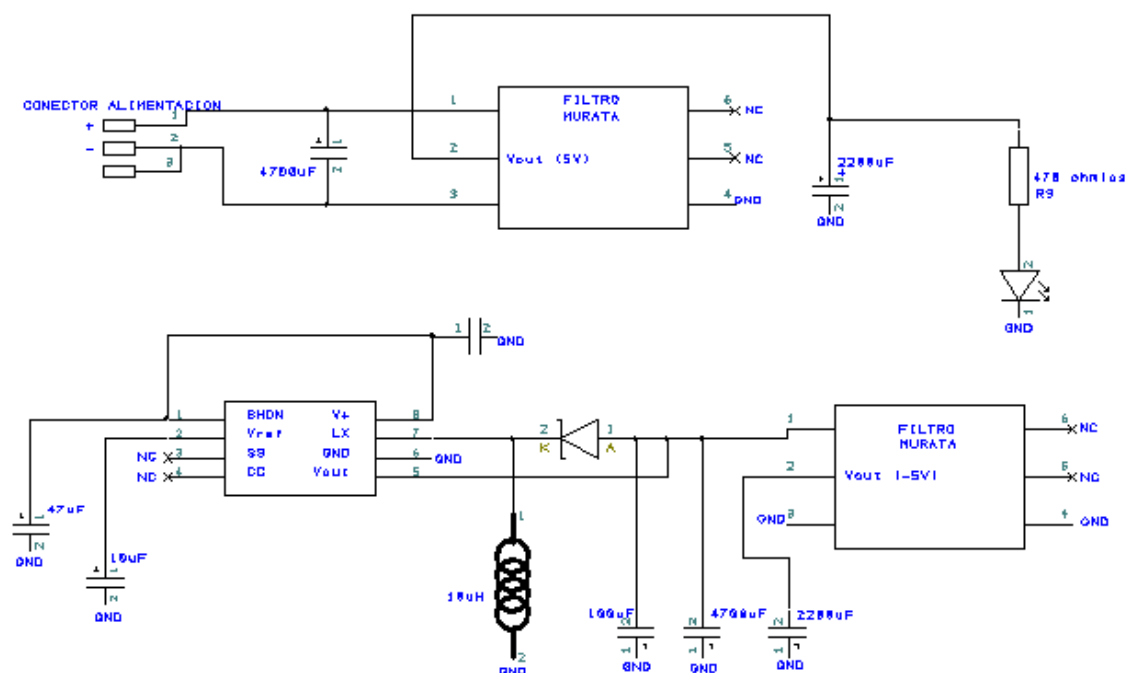
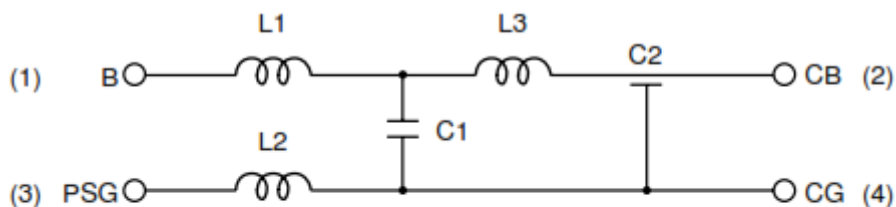


Imagen 5.9.- Bloque alimentación.

Para eliminar posibles ruidos de la red y de la propia fuente de alimentación, se ha colocado un filtro Murata BNX002 en cuyo interior hay un filtro LC en la siguiente disposición:



(1)-(4): Terminal Number
PSG: Power Supply Ground
CG: Circuit Ground
CB: Circuit+B

Imagen 5.10.- Esquema BNX002.

Con este filtro podemos eliminar ruidos procedentes de la red y de la fuente de alimentación. En concreto la fuente de alimentación produce un ruido y un rizado de un 1% de pico a pico en la banda de 20 MHz.

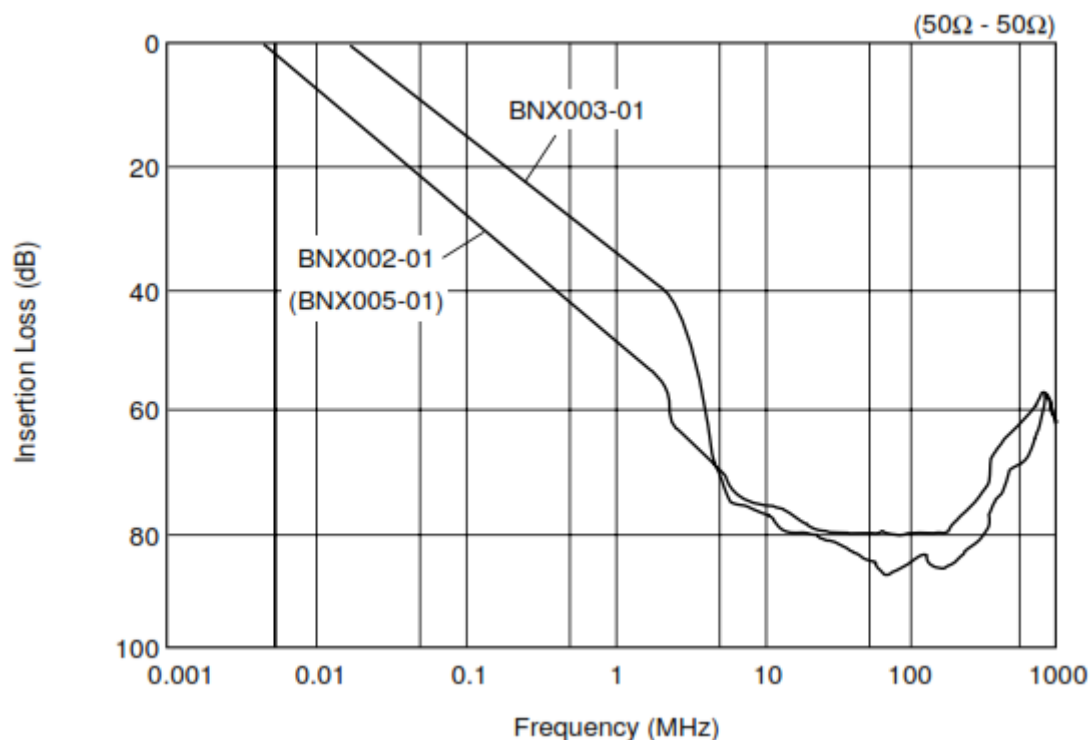


Imagen 5.11.- Gráfica atenuación BNX002.

Según esta gráfica el ruido producido por la fuente a 20 MHz tiene una atenuación de unos 75dB. También se incorporan dos condensadores electrolíticos de 4700 μ F y 2200 μ F a la entrada y a la salida del filtro para controlar picos de tensión. A la salida obtenemos una señal de 5v filtrada.

El circuito típico que propone el fabricante para el conversor DC/DC MAX735 es el siguiente:

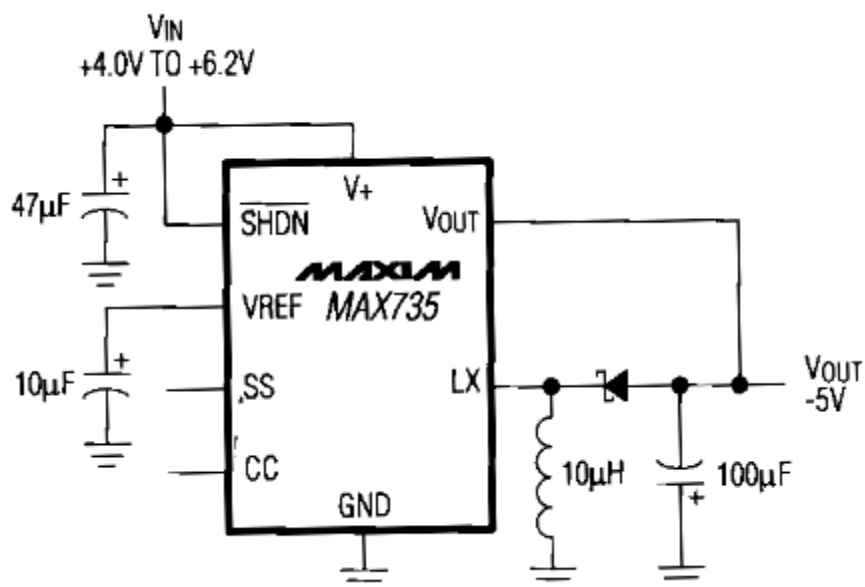


Imagen 5.12.- Circuito MAX735.

La salida del convertidor se hace pasar por la misma etapa que en el circuito anterior, el filtro choke con los condensadores electrolíticos. Esto se hace para eliminar posibles ruidos de conmutación producidos por el conversor. Estas dos señales, +5v y -5v, serán las fuentes de alimentación para los distintos integrados del circuito.

5.7.- DISEÑO PCB

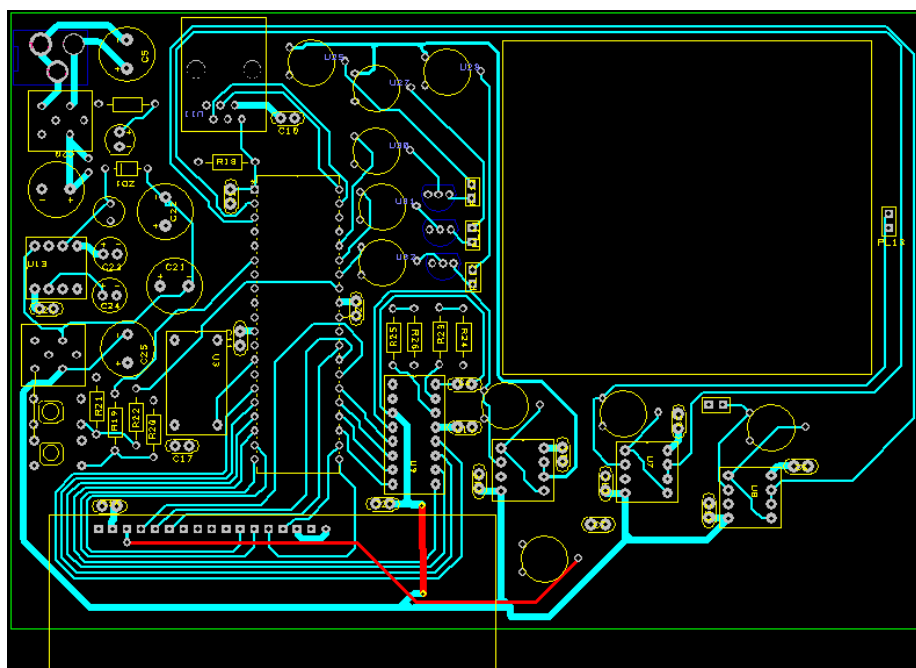


Imagen 5.13.- Footprint placa PCB.

La placa PCB se ha distribuido de forma que el usuario tenga fácil acceso y una correcta visualización de la pantalla LCD y de los pulsadores, estando estos en la parte inferior de la placa. El gran bloque de la parte superior corresponde al porta cubetas y el. Las pistas se han intentado hacer la mayor parte por la zona posterior (color azul), ya que todos los componentes van soldados por esta parte. La alimentación entre 5v y masa se hace mediante capas, es decir toda la parte superior está a potencial 5v y la parte posterior está conectada a masa. La alimentación de -5v se ha hecho mediante una pista de más grosor con respecto a las de señal.



Imagen 5.14.- Imagen 3D placa PCB.

6.-GUIA DE USUARIO

Para que el usuario sepa hacer buen uso de la interfaz del dispositivo, a continuación se hará una descripción de los distintos menús que ofrece y de las diferentes opciones que contiene.

Para seleccionar las distintas opciones, se disponen de dos pulsadores 1 y 2:

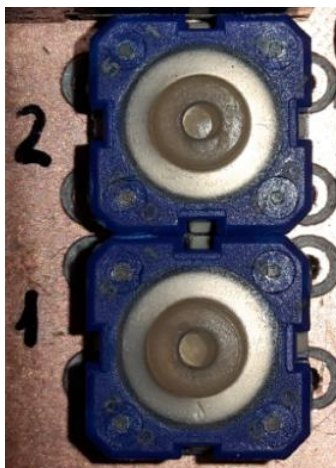


Imagen 6.1.- Pulsadores.

Con el pulsador número 1 seleccionamos la opción marcada con un 1 en el menú, y con el dos la opción 2.

Cuando se conecta el dispositivo la primera pantalla que se muestra es la de hacer medidas de transmitancia y absorbancia o de fosforescencia:



Imagen 6.2.- Menú 1.

Si se pulsa el pulsador 1 se accede a las medidas de absorbancia y transmitancia y se muestra la siguiente pantalla:



Imagen 6.2.- Menú 2.

En este apartado se puede seleccionar el voltaje de los diodos LED o se puede pasar directamente a realizar las medidas. Si se cambia el voltaje, este se queda por defecto en el 100%(5v). Cuando se cambia el voltaje, esta última selección es la que se quedará guardada hasta que se vuelva a modificar. Cuando el dispositivo es reiniciado, volverá a la opción por defecto del 100%.



Imagen 6.2.- Menú 3.

Para cambiar el voltaje se debe ir pulsando el pulsador 1 hasta que el ajuste sea el deseado, en ese momento pulsando el pulsador 2 accedemos al voltaje del siguiente diodo LED. El incremento es de un 10% cada vez que se pulsa el botón 1. Se debe realizar la misma operación para cada uno de los tres diodos LED.

Una vez ajustado el voltaje deseado se accede a la siguiente pantalla, que es la misma que si no se selecciona la opción de cambiar el voltaje:



Imagen 6.2.- Menú 4.

Aquí se debe seleccionar el tipo de medida que se quiere hacer. Si se elige la opción "Relativa", las medidas de absorbancia o transmitancia serán la relación de

una muestra entre un blanco. Si se seleccionan medidas absolutas el resultado será el obtenido directamente por el fotodiodo sobre la muestra.

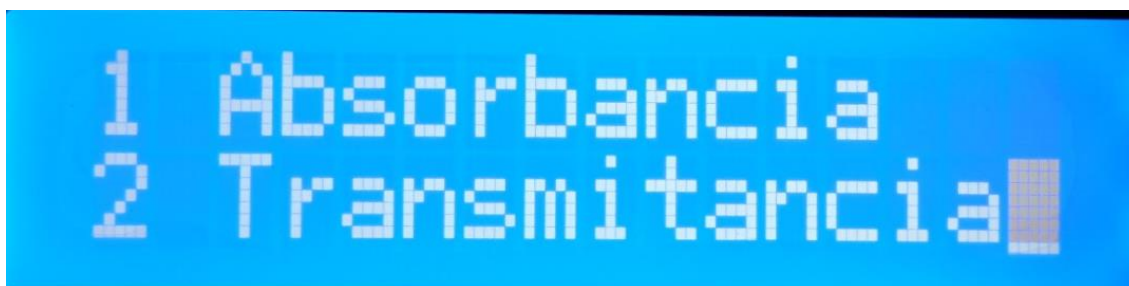


Imagen 6.2.- Menú 5.

El menú que se muestra para las dos opciones, absorbancia y transmitancia, es el mismo ya que tienen el mismo procedimiento.



Imagen 6.2.- Menú 6.

Primeramente se debe introducir el blanco y se selecciona inicio. Si se quiere volver a la pantalla principal se debe seleccionar la opción 2 "Exit". Cuando se pulsa inicio, el dispositivo realiza las medidas a las tres longitudes de onda ofrecidas por los diodos LED y las registra en el micro.

Mientras el dispositivo está tomando las medidas se muestra la siguiente pantalla:

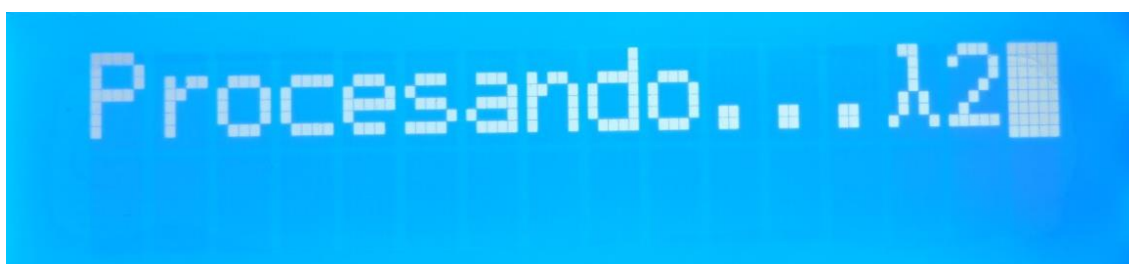


Imagen 6.2.- Menú 7.

Seguidamente el dispositivo pide que se retire la muestra blanca y se introduzca la muestra.



Introd muestra
1 inicio 2 exit_

Imagen 6.2.- Menú 8.

Se repite el mismo proceso que con el blanco, el dispositivo hace las diferentes medidas y las registra.

A continuación se muestran los resultados obtenidos:



$\lambda_1=009.49\%$
1 Siguiente_

Imagen 6.2.- Menú 9.



$\lambda_2=000.00\%$
1 Siguiente_

Imagen 6.2.- Menú 10.



$\lambda_3=077.64\%$
1 Siguiente

Imagen 6.2.- Menú 11.

En el caso de la transmitancia los resultados mostrados son el cociente entre la muestra y el blanco en porcentaje:

$$T \% = \frac{Muestra}{Blanco} \times 100$$

Para la absorbancia el resultado mostrado es:

$$A = -\log_{10} \left(\frac{Muestra}{Blanco} \right)$$

La medida absoluta consiste simplemente en hacer una medida de la muestra sin relación a ningún blanco. El resultado mostrado es directamente la medida obtenida por el fotodiodo. Para una mayor precisión, la medida mostrada es el resultado de hacer la media de 10 medidas diferentes. Con esto podemos minimizar el efecto del ruido en la medida.

Tras mostrarse los datos se accede nuevamente a la pantalla principal donde se podrán realizar nuevas medidas.

7.-RESULTADOS OBTENIDOS

En la siguiente tabla se ha querido observar el error que se puede cometer en la medida. Para ello se han introducido como blanco y como muestra la cubeta vacía. De este modo la absorbancia debería dar 0 y la transmitancia 100%. En este caso en el programa del pic se han obtenido 10 muestras por cada longitud de onda y se ha hecho la media para cada una, el proceso se ha repetido 3 veces:

Diodo LED	Absorbancia	Transmitancia
Rojo	-0,006	98,88%
	0,004	100,21%
	0,018	99,94%
Amarillo	0,011	100,94%
	0,000	100,94%
	-0,011	101,77%
Azul	-0,016	101,88%
	0,005	100,94%
	-0,005	98,09%

Tabla 7.1.- Resultado 1.

Se puede observar que las medidas son muy cercanas a lo teórico, pudiendo cometer un error tanto en transmitancia como en absorbancia de un 2%

Para la siguiente tabla se ha cambiado el código del programa para que tome las medidas con un intervalo de tiempo entre una y otra de 200ms, también realiza 10 medidas por longitud de onda. El proceso de medición es el mismo que el anterior:

Diodo LED	Absorbancia	Transmitancia
Rojo	0,002	100,87%
	0,000	100,08%
	0,007	101,32%
Amarillo	-0,005	100,34%
	0,000	101,40%
	0,006	97,87%
Azul	0,005	99,91%
	-0,005	99,91%
	0,002	99,33%

Tabla 7.2.- Resultado 2.

Con la mejora del intervalo de tiempo se han mejorado los resultados en torno a un 1%.

En la siguiente tabla se ha mantenido el cambio del intervalo de 200ms entre medida y medida y se ha cambiado el código para realizar una media de 15 medidas por longitud de onda. El proceso de toma de datos es el mismo que en los anteriores casos:

Diodo LED	Absorbancia	Transmitancia
Rojo	0,000	100,40%
	0,002	101,19%
	-0,002	102,42%
Amarillo	0,000	100,63%
	0,000	100,63%
	0,000	100,34%
Azul	0,000	100,81%
	0,002	99,70%
	0,000	100,81%

Tabla 7.3.- Resultado 3.

Se puede ver que con esta última mejora del código se ha reducido el error casi a menos de un 1%.

Para probar el dispositivo se han obtenido muestras de diferentes colores. Cada color tiene una relación de absorción y transmisión de las diferente longitudes de onda de la luz visible. También influye mucho la sensibilidad del ojo humano para percibir los colores. En la siguiente imagen podemos ver la eficiencia del ojo humano a las diferentes longitudes de onda:

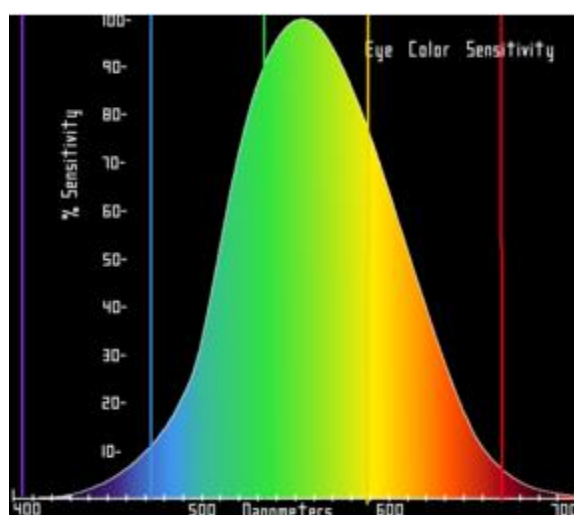


Imagen 7.1.- Sensibilidad ojo humano.

Acorde a esto para ver un color determinado, la muestra debe absorber las longitudes de onda que se encuentran por encima de la curva de sensibilidad relativa menos la

longitud de onda correspondiente a la que vemos iluminada con luz natural. Por ejemplo para ver el azul, la muestra deberá absorber los rojos y los verdes.

λ (nm)	Color	Color Complementario
380-435	Violeta	Verde-amarillo
435-480	Azul	Amarillo
480-490	Azul-verdoso	Anaranjado
490-500	Verde-azulado	Rojo
500-560	Verde	Púrpura
560-580	Verde-amarillo	Violeta
580-595	Rojo	Azul
595-650	Anaranjado	Azul-verdoso
650-780	Rojo	Verde-azulado

Imagen 7.2.- Relación absorción transmitancia colores.

En la tabla de la imagen 7.2 , podemos ver la relación entre el color reflejado en la muestra(columna de la derecha) y el color que absorbe(columna central).

Se ha probado el dispositivo para diferentes muestras de diferentes colores. En todos los casos como blanco se ha introducido una cubeta con agua destilada .Para la potencia de los leds se ha buscado que la medida absoluta sin muestra sea lo más cercana posible entre los 3. Esto se consigue con las siguientes potencias: rojo→40% ; amarillo → 100% ; azul→ 80%.

Los resultados son los siguientes:

Muestra: Congo red (Rojo); Blanco: cubeta agua destilada			
Diodo LED	Absorbancia	Transmitancia	Absoluto
Rojo(626nm)	0,616	25,61%	62
	0,614	25,72%	61
	0,586	25,51%	60
Amarillo(575nm)	3,000	0,00%	0
	3,000	0,00%	0
	3,000	0,00%	0
Azul(455nm)	3,000	0,00%	0
	3,000	0,00%	0
	3,000	0,00%	0

Tabla 7.4.- Resultados muestra Congo red.

En los resultados se ve que la muestra absorbe todo el amarillo y el azul, y deja pasar parte del rojo.

Muestra: Methylen blue (azul) ; Blanco: cubeta agua destilada			
Diodo LED	Absorbancia	Transmitancia	Absoluto
Rojo(626nm)	3,000	0,00%	0
	3,000	0,00%	0
	3,000	0,00%	0
Amarillo(575nm)	0,918	11,11%	23
	0,956	11,16%	23
	0,952	11,05%	23
Azul(455nm)	0,090	81,54%	137
	0,085	80,11%	133
	0,080	80,11%	137

Tabla 7.5.- Resultados muestra Methylen blue.

Para la muestra azul, los resultados revelan que absorbe todo el rojo y mucho del amarillo, en cambio el azul deja pasar la mayor parte.

Muestra: Thiazole yellow G(Amarillo) ; Blanco: cubeta agua destilada			
Diodo LED	Absorbancia	Transmitancia	Absoluto
Rojo(626nm)	-0,019	96,26%	232
	0,005	97,07%	235
	0,014	98,72%	234
Amarillo(575nm)	0,042	90,77%	186
	0,042	90,77%	184
	0,046	90,73%	185
Azul(455nm)	3,000	0,00%	0
	3,000	0,00%	0
	3,000	0,00%	0

Tabla 7.6.- Resultados muestra Thiazole yellow.

Para el amarillo, la muestra deja pasar prácticamente todo el amarillo y el rojo y absorbe todo el azul.

La medida del absoluto es el número de bits que alcanza el convertidor en la conversión analógico-digital del voltaje procedente del fotodiodo. El conversor es de 10 bit, por lo tanto el máximo de la medida absoluta es de 1023. El valor máximo y mínimo para la absorbancia es de +3 y -3, ya que debido a la resolución del convertidor la máxima y la mínima diferencia entre la muestra y el blanco queda limitada por los bits de este.

Así los rangos mínimo y máximo serían:

$$\text{Abs(máxima)} = -\log_{10} (1023 / 1) = -3$$

$$\text{Abs(mínima)} = -\log_{10} (1 / 1023) = 3$$

Para la medida de la fosforescencia no se han obtenido medidas, ya que el sistema está preparado por hardware para poder hacer esta medida, pero falta implementar el código de recogida y de tratamiento de la medida obtenida.

8.-CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Con los resultados obtenidos se puede definir varias conclusiones. Por un lado se ha podido observar que optimizando las opciones de medida en el código del pic, se ha minimizado el error debido a ruidos en torno a un 1%.

De los resultados obtenidos en la medida de muestra de colores podemos decir que tienen coherencia con la teoría. Para poder ver unos resultados más reveladores deberíamos poder hacer muestras con un color a una determinada longitud de onda y tener diodos LED que coincidan con estas, así podríamos ver más variación entre en los resultados.

En general todos los componentes del sistema funcionan correctamente dentro de la aplicación que se les da y no hay limitaciones de tipo hardware.

Para líneas futuras se podría acabar de implementar la medida para la fosforescencia, ya que en este sistema se ha dejado el hardware necesario para realizarlo pero no se ha acabado de implementar, incluyendo simplemente una demostración del parpadeo de un diodo LED. La teoría de este apartado es que si se incide sobre una muestra determinada, a una longitud de onda determinada y con una determinada frecuencia, la muestra emite luz a esa misma frecuencia, con una amplitud menor y con un determinado desfase. Midiendo ese desfase podemos medir la fosforescencia.

También en líneas futuras podría hacerse la comunicación con un PC mediante un puerto serie o un puerto paralelo. Las ventajas de este sistema son que se podrían obtener las medidas en el ordenador y se podría trabajar con ellas para la realización de gráficas, tablas, etc. También podría controlarse el sistema mediante una interfaz en el propio ordenador, pudiendo hacerse las medidas remotamente.

En dispositivos futuros se podrían incluir una mayor variedad de diodos LED con longitudes de onda diferentes y algún sistema óptico para focalizar la luz de los diodos.

9.-PRESUPUESTO MATERIALES

REFERENCIA FABRICANTE	DESCRIPCION	PRECIO UNIDAD	Nº UNIDADES	TOTAL
HLMP-EG08-YZ000	LED 626 nm	0,856 €	1	0,856 €
L-53MBC	LED 455 nm	1,266 €	1	1,266 €
TLHG5800	LED 576 nm	0,104 €	1	0,104 €
PIN-6DI	FOTODIODO	41,92 €	2	83,84 €
RTF-5010	MOLDURA LED	0,23 €	3	0,69 €
MHRJ66NFRA	CONECTOR RJ11	1,33 €	1	1,33€
DAC0808LCN	CONVERSOR DIGITAL- ANALOGICO	1,98 €	1	1,98 €
1.14.100.501/0000	PULSADOR	1,58 €	2	3,16 €
04M000000L638	OSCILADOR	6,80 €	1	6,80 €
2227MC-40-06- 05-F1	ZÓCALO 40 PIN	1,38 €	1	1,38 €
2227MC-08-03- 18-F1	ZÓCALO 16 PIN	0,734 €	1	0,734 €
808-AG11D-ESL- LF	ZÓCALO 8 PIN	0,699 €	4	2,796 €
MAX735EPA+	CONVERSOR DC/DC 5V→-5V	7,08 €	1	7,08 €
932-MIKROE-55	PANTALLA LCD	9,69 €	1	9,69 €
PIC16F877A-I/P	MICROCONTROLADOR	6,60 €	1	6,60 €
BNX002-01	FILTRO	8,86 €	2	17,72 €
MCEXT5V15WC1	FUENTE ALIMENTACION	16,98 €	1	16,98 €
MJ-179PH	CONECTOR ALIMENTACION	0,699 €	1	0,699 €
MCP6292-E/P	A.O.	0,91 €	3	2,73 €
RLB0712-100KL	BOBINA	0,261 €	1	0,261 €
711-1006	CONDENSADOR ELECTROLÍTICO 2200µF	0,268 €	2	0,536 €
ECA1AHG472	CONDENSADOR ELECTROLITICO 4700 µF	0,926 €	2	1,852 €
TOTAL				169,084

10.-BIBLIOGRAFÍA

- Datasheets componentes
- <http://labotienda.com/documentos/folletos/apEspectro.pdf>
- <http://bvs.per.paho.org/texcom/cd048437/electroe.pdf>
- <http://www.tutoelectro.com/tutoriales/microcontroladores/guia-pic/conversor-analogico-digital/>
- <http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/PAEEES/2004-05/A02-A03%20-%20Conversor%20AD%20del%20PIC16F877.pdf>
- http://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETR%C3%8DA.pdf
- http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/14295/PFC_Pablo_Blazquez_Campo.pdf?sequence=1
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/electronic/opampvar2.html#c2>
- <http://www.utp.edu.co/~eduque/arquitec/PIC16F877.pdf>
- <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3750/1/53944-1.pdf>
- <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.10/0/2718/Tesis.pdf?sequence=1>
- <http://bueno-saber.com/aficiones-juegos-y-juguetes/ciencia-y-naturaleza/diferencia-entre-espectrofotometro-y-espectrometro.php>
- http://www.infoagro.com/instrumentos_medida/medidor.asp?id=6022
- <http://www.montreal-biotech.com/index.php/products-32/spectrophotometers/biochrom/libra-s60-uv-vis-2nm-bandpass-double-beam-1066.html>
- <http://www.elicrom.com/colorimetro-portatil-led-dr-900-9385100/>
- <http://latam.hach.com/colorimetro-portatil-dr-900/product-details?id=16047055713>
- <https://es.wikipedia.org/wiki/Espectroscopia>
- http://www.uv.es/qflab/2012_13/descargas/cuadernillos/qf1/castellano/Teoria/Absorbancia.pdf
- http://www.uam.es/docencia/qmapcon/QUIMICA_GENERAL/Practica_4_Colorimetria_Ley_de_Lambert_Beer.pdf

11.-ANEXOS

Código PIC:

```
#include<htc.h>                                //Librería del micro a usar
#include"lcd.h"                                // Librería del LCD
#include"lcd.c"
#include"math.h"                                //Librería operaciones matemáticas
__CONFIG(WRT_OFF & WDTE_OFF & PWRTE_OFF & FOSC_XT & LVP_OFF);
/*~~~~~*/
//WRT_OFF = Código no Potegido
//WDTE_OFF = Watch Dog Timer Desactivado
//PWRTE_OFF = Power Activado
//FOSC_XT = Oscilador cristal
//LVP_OFF = Low Voltaje Porgramming Desactivado
/*~~~~~*/

#define _XTAL_FREQ 4000000                      //Oscilador de 4MHZ

//+++++Declaración variables+++++

void encender1(char led);
void potencia (char x5);
void mostrar1 (unsigned short lectura3, unsigned short lectura4,char x5);
void mostrar2 (double abrel1,char x5);
void mostrar3 (unsigned short lectura3, char x5);
const unsigned char
codigo[]={179,184,189,194,198,203,207,212,216,220,224,228,232,235,238,241,244,247,249,2
51,252,254,255,255,255,255,255,255,254,252,251,249,247,244,241,238,235,232,228,224,
220,216,212,207,203,198,194,189,184,179,174,170,165,160,155,151,147,142,138,134,130,12
7,123,120,117,114,112,110,108,106,105,104,103,103,102,103,103,104,105,106,108,110,112,1
14,117,120,123,127,130,134,138,142,147,151,155,160,165,170,174};
int a;
bit marca,marca2,marca3,marca6,marca7,marca8,marca9;
char x,x3,x4,x5,y,led;
unsigned short lectura[6],media[15],lectura2,lectura3,lectura4,x2;
unsigned char pot[3];
unsigned char posicion=0,paso;
unsigned char frecuencia_muestreo = 200; // Frecuencia con la que se reconstruye la señal
unsigned char frecuencia_salida = 2; // Frecuencia de la señal de salida

double absrel1,a1,a2;

//+++++
```

//++++++PROGRAMA++++++

void main()

{

```
GIE = 1; //Interrupciones Globales Activadas
PEIE = 1; //Interrupciones de los Periféricos Activadas
ADCON0 = 0b10000001; // Reloj Conversión Fosc/64,
// Canal conversión 0
// Puesta en marcha del conversor
ADCON1= 0b10000010; // Justificado a la derecha
//de AN0 a AN4 analógica y el resto digital
// Vdd y Vss
```

T2CON=0b001000001; // Configurar TMR2 para que interrumpa según
marca la frecuencia de muestreo

```
GIE = 1; //Interrupciones globales habilitadas
PEIE = 1; // Interrupciones periféricos habilitadas
TMR2IE = 1; // TMR0 con capacidad de interrumpir
TMR2IF = 0; // Flag de interrupción de TMR2 desactivado
PR2 = 124; // Hacemos el cálculo para TMR2 interrumpa
```

según la frecuencia de muestreo

```
TMR2=0;
pot[0]=100;
pot[1]=100;
pot[2]=100;
```

while(1)

{

```
    marca=0; //Inicializamos las variables
    marca2=0;
    marca3=0;
    marca6=0;
    marca7=0;
    marca8=0;
    led=2;
    lectura[0]=0;
    lectura[1]=0;
    lectura[2]=0;
    lectura[3]=0;
    lectura[4]=0;
    lectura[5]=0;
    media[0]=0;
    media[1]=0;
```

```

media[2]=0;
media[3]=0;
media[4]=0;
media[5]=0;
media[6]=0;
media[7]=0;
media[8]=0;
media[9]=0;
x3=0;
TRISA=0b00110011; //Configuramos entradas y salidas de los puertos
TRISD=0b00000000;
TRISB=0b00000001;
TRISC=0b00000000;
PORTB=0;
PORTC=0;
while(RA4==0);
while(RB0==0);
lcd_init(); //Inicializamos LCD
lcd_goto(0x00);
lcd_puts("1 Abs/Trans");
lcd_goto(0x28);
lcd_puts("2 Fosforescencia");
while(RA4==1&&RB0==1);
if(RA4==0) //Pulsando RA4 se accede al
submenú de absorbancia y transmitancia
{
    while(RA4==0);
    marca=1;
    lcd_clear();
    lcd_goto(0x00);
    lcd_puts("1 Selec potencia"); //Si pulsamos RA4 se accede al
submenú de selección de voltaje de los LED
    lcd_goto(0x28);
    lcd_puts("2 Medidas");
    while(RA4==1&&RB0==1);
    if(RA4==0)
    {
        while(RA4==0);
        while(marca3==0)
        {
            x5=1;
            potencia(x5); //mediante la función potencia
se ajusta el voltaje para cada uno de los tres diodos LED.
        }
    }
}

```

```

        marca3=0;
        while(RB0==0);
        while(marca3==0)
        {
            x5=2;
            x3=1;
            potencia(x5);
        }
        marca3=0;
        while(RB0==0);
        while(marca3==0)
        {
            x3=2;
            x5=3;
            potencia(x5);
        }
        while(RB0==0);
    }
    while(RB0==0);
    lcd_clear();
    lcd_goto(0x00);
    lcd_puts("1 Relativa");
    lcd_goto(0x28);
    lcd_puts("2 Absoluta");
    while(RA4==1&&RB0==1);
    if(RA4==0) //Pulsando RA4 accedemos a
las medidas relativas de absorbancia y transmitancia
    {
        while(RA4==0);
        marca7=1;
        lcd_clear();
        lcd_goto(0x00);
        lcd_puts("1 Absorbancia");
        lcd_goto(0x28);
        lcd_puts("2 Transmitancia");
        while(RA4==1&&RB0==1); //Absorbancia relativa
        if(RA4==0)
        {
            while(RA4==0);
            marca8=1;
            lcd_clear();
            lcd_goto(0x00);
            lcd_puts("Intr blanca");
            lcd_goto(0x28);
        }
    }

```

```

lcd_puts("1 inicio 2 exit");
while(RA4==1&&RB0==1);
if(RA4==0) //blanca absorbancia relativa
{
    while(RA4==0);
    marca2=1;
    x=0;
    x3=0;
    led=2;
    while(led<9)
    {
        encender1(led); //llamada función
        led=led*2; //encendido de leds
    }
    lcd_clear();
    lcd_goto(0x00);
    lcd_puts("Introd muestra");
    lcd_goto(0x28);
    lcd_puts("1 inicio 2 exit");
    while(RA4==1&&RB0==1);
}
if(RA4==0&&marca2==1)
{
    marca2=0;
    while(RA4==0);
    x=3;
    x3=0;
    led=2;
    while(led<9)
    {
        encender1(led);
        led=led*2;
    }
    //se opera con las medidas para obtener la
    x5=1; //absorbancia y para que no se salga
    a1=lectura[3]; //de rangos(+3 y -3)
    a2=lectura[0];
    absrel1 = (-log10(a1))-(-log10(a2));
    if(lectura[3]==0&&lectura[0]!=0)absrel1=3;
    if(lectura[3]!=0&&lectura[0]==0)marca9=1;
    if(lectura[3]==0&&lectura[0]==0)absrel1=0;
    mostrar2 (absrel1,x5);
    x5=2;
    while(RA4==1);
    while(RA4==0);
}

```



```

        a1=lectura[4];
        a2=lectura[1];
        absrel1 = (-log10(a1))-(-log10(a2));
        if(lectura[4]==0&&lectura[1]!=0)absrel1=3;
        if(lectura[4]!=0&&lectura[1]==0)marca9=1;
        if(lectura[4]==0&&lectura[1]==0)absrel1=0;
        mostrar2(absrel1,x5);
        x5=3;
        while(RA4==1);
        while(RA4==0);
        a1=lectura[5];
        a2=lectura[2];
        absrel1 = (-log10(a1))-(-log10(a2));
        if(lectura[5]==0&&lectura[2]!=0)absrel1=3;
        if(lectura[5]!=0&&lectura[2]==0)marca9=1;
        if(lectura[5]==0&&lectura[2]==0)absrel1=0;
        mostrar2(absrel1,x5);
        while(RA4==1);
    }

}

if(RB0==0&&marca8==0)    //Transmitancia relativa
{
    while(RB0==0);
    lcd_clear();
    lcd_goto(0x00);
    lcd_puts("Introd blanca");
    lcd_goto(0x28);
    lcd_puts("1 inicio 2 exit");
    while(RA4==1&&RB0==1);
    if(RA4==0)    //Blanco transmitancia relativa
    {
        while(RA4==0);
        marca2=1;
        x=0;
        x3=0;
        led=2;
        while(led<9)
        {
            encender1(led);
            led=led*2;
        }
    }
    lcd_clear();
    lcd_goto(0x00);
}

```

```

        lcd_puts("Introd muestra");
        lcd_goto(0x28);
        lcd_puts("1 inicio 2 exit");
        while(RA4==1&&RB0==1);
        if(RA4==0&&marca2==1)
        {
            while(RA4==0);
            x=3;
            x3=0;
            led=2;
            while(led<9)
            {
                encender1(led);
                led=led*2;
            }
            x5=1;
            marca2=0; //se muestran los datos mediante la
            lectura3=lectura[3]; // función mostrar1
            lectura4=lectura[0];
            mostrar1 (lectura3,lectura4,x5);
            x5=2;
            while(RA4==1);
            while(RA4==0);
            lectura3=lectura[4];
            lectura4=lectura[1];
            mostrar1(lectura3,lectura4,x5);
            x5=3;
            while(RA4==1);
            while(RA4==0);
            lectura3=lectura[5];
            lectura4=lectura[2];
            mostrar1(lectura3,lectura4,x5);
            while(RA4==1);
        }
    }

}

if(RB0==0&&marca7==0) //Medida absoluta
{
    while(RB0==0);
    lcd_clear();
    lcd_goto(0x00);
    lcd_puts("Introd muestra");
    lcd_goto(0x28);

```

```

lcd_puts("1 Iniciar 2 Exit");
while(RA4==1&&RB0==1); //Inicio medida absoluta
if(RA4==0)
{
    while(RA4==0);
    x=3;
    x3=0;
    led=2;
    while(led<9)
    {
        encender1(led);
        led=led*2;
    }
    x5=1; //se muestran los datos mediante la función
        //mostrar 3
    marca2=0;
    lectura3=lectura[3];
    mostrar3 (lectura3,x5);
    x5=2;
    while(RA4==1);
    while(RA4==0);
    lectura3=lectura[4];
    mostrar3(lectura3,x5);
    x5=3;
    while(RA4==1);
    while(RA4==0);
    lectura3=lectura[5];
    mostrar3(lectura3,x5);
    while(RA4==1);
}
}

if(RB0==0&&marca==0) //submenú de fosforescencia
{
    marca6=0;
    paso = (frecuencia_salida*100)/frecuencia_muestreo;//seleccionamos
    while(RB0==0); //posición tabla
    lcd_clear();
    lcd_goto(0x00);
    lcd_puts("Int muestra");
    lcd_goto(0x28);
    lcd_puts("1 Inicio 2 Exit");
    while(RA4==1&&RB0==1);
}

```

```

if(RA4==0)
{
    lcd_clear();
    lcd_goto(0x00);
    lcd_puts("1 Exit");
    while(RA4==0);
    TMR2ON=1;    //El timer2 interrumpe cuando acaba la cuenta
    PORTB=0b00000010;
    while(marca6==0)
    {
        if(RA4==0)
        {
            marca6=1;
            TMR2ON=0; //paramos timer2
        }
    }
}
}
}
}

```

//+++++

//+++++INTERRUPCION TMR2+++++

```

static void interrupt isr(void)    //Función de atención a la interrupción
{
    if(TMR2IF==1)    //Ha pasado el tiempo de muestreo
    {
        TMR2IF = 0;
        //Reiniciamos la cuenta de TMR2;
        TMR2ON=0;
        TMR2 = 0;
        TMR2ON=1;

        PORTC = codigo[posicion];    //Sacamos por el PORTC el dato que
                                     //toca
        posicion =    posicion+paso; // Incrementamos el índice que recorre
                                     //la tabla

        if (posicion >= 100)
            posicion -= 100;    //Si nos pasamos del final de la tabla,
                                //volvemos a empezar con el offset
    }
}

```

```

    }
}

//+++++++Fin programa+++++++

//+++++++FUNCIONES+++++++

//+++++++Mostrar 1+++++++

void mostrar1 (unsigned short  lectura3, unsigned short  lectura4,char x5) // muestra el
resultado de transmitancia en %
{
    lcd_clear();
    lcd_goto(0x00);
    lcd_putch(0b11101001);
    lcd_putch(x5+0x30);           //el número hay que sacarlo en código ASCII
    lcd_puts("=");                //sumándole al número de la variable 0x30
    lcd_putch((lectura3/lectura4)|0x30); //se muestra la parte entera del cociente
    x2=(lectura3*10)/lectura4;
    lcd_putch((unsigned char)(x2%10)|0x30); //se muestran el primer decimal del cociente
    x2=(lectura3*100)/lectura4;      // y el segundo multiplicados por 100
    lcd_putch((unsigned char)(x2%10)|0x30);
    lcd_puts(".");
    x2=(lectura3*1000)/lectura4;     //se muestran dos decimales
    lcd_putch((unsigned char)(x2%10)|0x30);
    x2=(lectura3*10000)/lectura4;
    lcd_putch((x2%10)+0x30);
    lcd_puts("%");
    lcd_goto(0x28);
    lcd_puts("1 Siguiente");
}

//+++++++

//+++++++Mostrar 2+++++++

void mostrar2 (double absrel1,char x5)// función para mostrar resultado de absorbancia
{
{
    lcd_clear();
    lcd_goto(0x00);
    lcd_putch(0b11101001);
    lcd_putch(x5+0x30);
    lcd_puts("=");
    if(marca9==1) //Si el blanco da cero y la muestra no la absorbancia es la menor posible
    {

```

```

        absrel1=3;
        lcd_puts("-");
    }
    if(absrel1<0)    //si el resultado es negativo, se invierten los factores para que el pic lo
tome como positivo y poder operar. Se añade un – delante para indicar que es negativo
    {
        absrel1=(-(log10(a2)))-(-(log10(a1)));
        lcd_puts("-");
    }
    a=absrel1;
    lcd_putchar((unsigned char)a|0x30);
    a=(absrel1*10);
    lcd_puts(".");
    lcd_putchar((unsigned char)(a%10)|0x30);
    a=(absrel1*100);
    lcd_putchar((unsigned char)(a%10)|0x30);
    a=(absrel1*1000);
    lcd_putchar((unsigned char)(a%10)|0x30);
    lcd_goto(0x28);
    lcd_puts("1 Siguiente");
} //+++++

```

//+++++Mostrar 3+++++

void mostrar3 (unsigned short lectura3, char x5) //función para mostrar medidas absolutas con un decimal

```

{
    lcd_clear();
    lcd_goto(0x00);
    lcd_putchar(0b11101001);
    lcd_putchar(x5+0x30);
    lcd_puts("=");
    lcd_putchar((unsigned char)(lectura3/1000)|0x30);
    x2=(lectura3%1000);
    lcd_putchar((unsigned char)(x2/100)|0x30);
    x2=(lectura3%100);
    lcd_putchar((unsigned char)(x2/10)|0x30);
    lcd_putchar((unsigned char)(x2%10)|0x30);
    lcd_puts(" counts");
    lcd_goto(0x28);
    lcd_puts("1 Siguiente");
} //+++++

```

//+++++++selección potencia+++++++

void potencia (char x5)//sirve para modificar la variable pot[x5] de 10 en 10 cada vez que se

```
{
    // pulsa el botón b1
    lcd_clear();
    lcd_goto(0x00);
    lcd_puts("Selec pot");
    lcd_putch(x5+0x30);
    lcd_goto(0x0B);
    lcd_puts("1 +");
    lcd_goto(0x28);
    lcd_puts("Pot=");
    lcd_putch((unsigned char)(pot[x3]/100)|0x30);
    if (pot[x3]<100)lcd_putch((unsigned char)(pot[x3]/10)|0x30);
    if (pot[x3]==100)lcd_putch((unsigned char)(pot[x3]%10)|0x30);
    lcd_putch((unsigned char)(pot[x3]%10)|0x30);
    lcd_puts("%");
    lcd_goto(0x4A);
    lcd_puts("2 Exit");
    while(RA4==1&&RB0==1);
    if(RB0==0)marca3=1;
    if(RA4==0)
    {
        while(RA4==0);
        pot[x3]=pot[x3]+10;
        if(pot[x3]>100)pot[x3]=10;
    }
}
```

//+++++++

//+++++++encendido leds+++++++

void encender1 (char led) //Función para secuencia de encendido de los led y conversión

```
{
    //analógico-digital de la medida
    switch(pot[x3]) //miramos valor de la variable pot[x5] para sacar un
                    //voltaje para cada led por el puerto c hacia el
    {
        //conversor digital-analógico
        case 10:
            PORTC=0b00011001;
            break;
        case 20:
            PORTC=0b00110011;
            break;
        case 30:
            PORTC=0b01001101;
            break;
    }
```

```

        case 40:
            PORTC=0b01100110;
            break;
        case 50:
            PORTC=0b10000000;
            break;
        case 60:
            PORTC=0b10011010;
            break;
        case 70:
            PORTC=0b10110011;
            break;
        case 80:
            PORTC=0b11001101;
            break;
        case 90:
            PORTC=0b11100110;
            break;
        case 100:
            PORTC=0b11111111;
            break;
    }
    __delay_ms(1000);
    lcd_clear();
    lcd_goto(0x00);
    lcd_puts("Procesando...");
    lcd_putch(0b11101001);
    lcd_putch((unsigned char)(x3+1)+0x30);
    PORTB=led;
    __delay_ms(2000);
    for(y=0;y<11;y++)
    {
        GO_DONE=1;
        while(GO_DONE==1);
        lectura2=(ADRESL + (ADRESH << 8)
        media[y]=lectura2;
    }
    lectura[x]=(media[0]+media[1]+media[2]+media[3]+media[4]+media[5]+media[6]+media[7]+media[8]+media[9])/10;
    x++;
    PORTB=0;
    x3++;
}

```

//Se realizan 10 medidas y se convierten a digital

//Se recoge el número binario
// correspondiente a la medida.

//Se realiza la media de las 10 medidas



//+++++++Fin funciones+++++++